

직류 접지극의 전식보호 방법 연구

정우용¹, 김호성[†]

Research on Protection Method for Ground Electrode of DC Systems from Corrosion

Woo-Yong Jeong¹ and Hyosung Kim[†]

Abstract

In contrast to AC grounding systems, the ground electrode in DC systems continuously maintains positive or negative polarity. Ground electrodes with (+) polarity proceeds by oxidation reaction. Thus, the DC current should flow opposite to the polarity of the leakage current flowing through the (+) ground electrode by using a compensation electrode, and the current flowing through the (+) ground electrode can be 0A. However, according to protecting the (+) ground electrode, the compensation electrode corrodes and gets damaged. Thus, the (+) ground electrode must be protected from corrosion, and the service life of the compensation electrode must be extended. As an alternative, the average value of the current flowing through the compensation electrode should be equal with the value of the leakage current flowing through the (+) ground electrode by using the square waveform. Throughout the experiment, the degree of corrosion on the compensation electrode is analyzed by the frequency of the compensation electrode for a certain time. In the experiment, the frequencies of the square waveform are considered for 0.1, 1, 10, 20, 50, 100 Hz, and 1 kHz. Through experiments and analysis, the optimal frequency for reducing the electrolytic damage of the (+) electrode and compensation electrode in an LVDC grounding environment is determined.

Key words: Ground electrode, Corrosion, Electrolytic damage, Frequency

1. 서 론

직류 배전 시스템이 확대됨에 따라 직류 배전 시스템에 대한 보호 대책의 중요성도 같이 증가하고 있다. 특히 접지는 직류 배전 시스템에 대한 안전을 확보하기 위한 필수대책 중 하나이며, 인명과 설비를 감전 및 지락사고로부터 보호하는 일차적 역할을 한다. 극성이 일정한 주기로 교번되는 교류 접지 환경과는 달리 직류 접지 환경에서 접지극은 각각 (+) 또는 (-) 극성을 일정하게 유지한다.

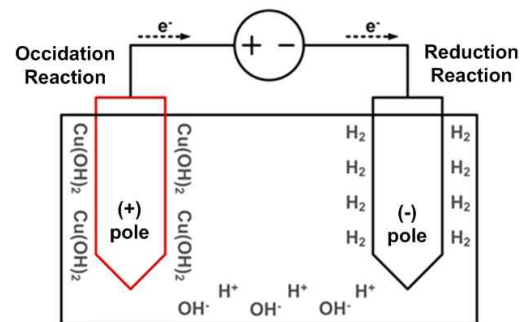


Fig. 1. Schematic diagram of electrode connected to DC power supply.

이때 그림 1과 같이 금속의 전식현상에 따른 전기화학반응으로 인해 극성에 따라 접지극의 전기부식이 다르게 나타난다^[1]. (-) 극성을 가진 접지극은 환원 반응에 의해 수용액으로 방출된 전자가 수용액의 H⁺이온과 결합을 하여, 수소 기포가 발생한다. 이는 이상적으로 (-) 극성을 가진 접지극은 어떠한 부식도 발생하지 않음을 의미한다.

Paper number: TKPE-2021-26-2-3

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: hyoskim@kongju.ac.kr, Div. of Electrical, Electronic and Control Eng., Kongju National University, Korea
Tel: +82-41-521-9167 Fax: +82-41-563-3689

¹ Dept. of Electrical, Electronic and Control Eng., Kongju National University, Korea

Manuscript received Oct. 19, 2020; revised Nov. 23, 2020; accepted Dec. 11, 2020

— 본 논문은 2020년 전력전자학술대회 우수추진논문임

반면 (+) 극성을 가진 접지극은 산화 반응에 의해 구리 원자 Cu는 (+)극 방향으로 전자를 잃게 되며, 구리 이온화 Cu^{2+} 는 수용액속 OH^- 이온과 결합하여 산화물 $Cu(OH)_2$ 를 생성한다. 이때 $Cu(OH)_2$ 이 전극으로부터 떨어져 나가며, (+) 접지극에 심각한 손상이 발생된다. (+)

접지극에서 발생하는 전식으로 인한 손상은 직류 배전 시스템에 안전사고를 일으킬 수 있다. 특히 선체를 통해 회로가 구성된 선박의 사고누설전류로 인해 선체에 전식을 일으켜 구멍을 발생시키거나, 전기철도 직류 배전시스템 주변의 교량을 구성하는 철재 빔이나 지하에 설치된 금속 가스관으로 누설전류가 흘러 부식을 일으킬 수도 있다^{[2]-[4]}.

전기철도시스템에서는 전식위험을 막기 위한 방법으로는 수동적인 방법으로 누설저항이 큰 콘크리트 침목을 적용하거나, 침목에 슈퍼 폴리머 코팅을 적용하는 방법이 있고, 능동적인 방법으로 배류기를 사용하는 방법이 있다. 그러나 침목 등의 설치에 의한 누설저항은 시간에 따른 경년변화로 인하여 최초 설계한 값이 달라질 수 있으며, 배류기를 사용하는 경우도 잘못된 시공이나 설비노후로 인하여 전식사고가 자주 발생하고 있다^[5].

본 논문에서는 전식으로 인한 손상이 발생할 수 있는 (+) 접지극을 최대한 전식으로 인한 손상으로부터 보호하기 위해 보호전극을 사용한다. 보호전극은 (+) 접지극에 흐르는 누설전류의 극성과 반대로 직류전류를 흘려주어 (+) 접지극에 흐르는 전류가 0A가 되도록 한다. 본 논문에서 제시하는 방법은 능동적인 방법으로서 (+) 접지극에 해당되는 전식이 발생하는 위치에서 누설전류를 검출하여 되먹임하는 개념으로 사용된다면 전식사고가 발생하는 특정 부위의 전식을 보상할 수 있다. 하지만 보호전극은 (+) 접지극을 최대한 전식으로 인한 손상으로부터 보호함에 따라 산화반응으로 인한 전식 현상이 발생하여 손상이 진행된다.

본 연구에서는 (+) 접지극을 전식으로 인한 손상을 최대한 감소시키고 동시에 보호전극의 사용 수명을 연장시키기 위해, 보호전극에 흐르는 전류의 평균값이 (+) 접지극으로 흐르는 누설전류의 크기와 같은 구형파의 전류형태가 되도록 시도하였다. 실험에서 사용된 구형파 전류의 주파수는 0.1Hz, 1Hz, 10Hz, 20Hz, 50Hz, 100Hz, 1kHz를 고려하였다. 이때 키르히호프의 전류법칙에 의해 (+) 접지극에 흐르는 전류는 일정한 주기로 교번되는 교류 구형파 형태가 되며 평균값은 0A가 된다.

본 연구에서는 일정 시간 동안 직류 접지계통에 보호극 측의 전원을 가동하여 보호극 전원의 주파수에 따른 보호극의 전식 정도를 실험을 통해 분석하였다. 또한, 보호전극에 직류전류(DC)를 흘릴 경우도 같이 비교를 하였다. 이를 통해 저압직류(LVDC) 접지 환경에서 주파수에 따른 (-) 접지극과 (+) 접지극, 보호전극의 전식 정도를 분석하고 전식 정도가 낮은 최적의 주파수 조건을 제시하며, 이에 대한 원인을 분석한다.

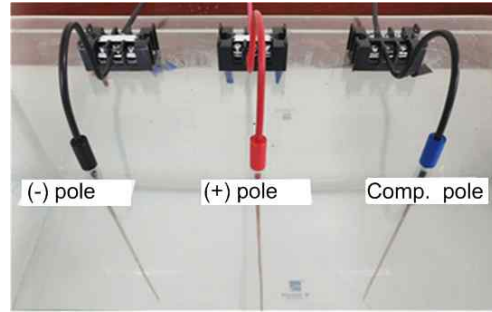


Fig. 2. Experimental environment.

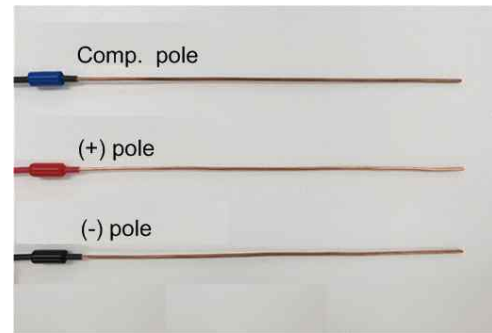


Fig. 3. Ground electrode used in experiment.

2. 접지 실험

2.1 실험 환경

직류 접지 환경에서 (+) 접지극에 보호전극을 연결하여 (-) 접지극과 (+) 접지극, 보호전극의 손상 정도에 관한 실험을 진행하였다.

그림 2는 실험에서의 환경을 나타낸다. 실험을 빠른 시간 안에 진행하기 위해, 접지극을 땅속에 매립하는 대신 소금물에 담그는 것으로 대체하였다. 이때 사용된 소금은 총 1.5kg이며, 소금물의 부피는 39.23L이다. 실험 진행 전 염도는 평균 3.4-3.5%로 관리 되었다.

그림 3은 실험에서 사용된 접지극을 나타낸다. 접지극은 (-) 접지극과 (+) 접지극, 그리고 보호전극으로 총 세 대를 사용하였다. 사용된 접지극의 재질은 단심 구리 전선이다. 소금물에 담글 접지선의 길이는 22cm이며, 무게는 22cm 기준 7.6g이다. 접지극은 그림 2과 같이 왼쪽으로부터 (-) 접지극, (+) 접지극, 보호전극 순으로 소금물에 담갔다.

먼저 보호전극에 주파수를 가진 전류가 흐를 경우와 직류 전류(DC)가 흐를 경우에 대한 접지극의 손상 정도를 비교하는 것이 필요하다. 이를 위해 보호전극에 전류(DC)가 흐를 경우에 대한 실험을 진행하였다.

그림 4는 보호전극을 DC로 구동할 경우의 실험 개념도를 나타낸다. 누전사고를 모의하는 (-) 접지극과 (+) 접지극 사이에 연결된 전원은 150VDC 전압의 전압원으로 설정하였다. 누설전류는 (-) 접지극에서 (+) 접지극으로 전류 1A가 흐르도록 150Ω의 값을 갖는 부하저항을

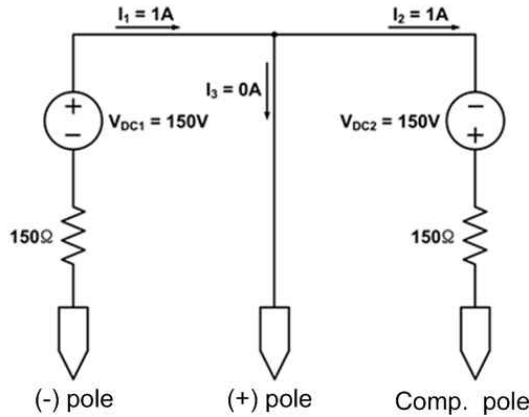


Fig. 4. Experimental conceptual diagram (when compensation electrode is driven by DC).

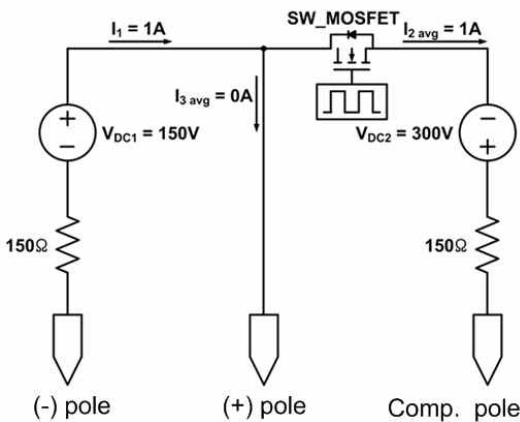


Fig. 5. Experimental conceptual diagram (when compensation electrode is driven by square waveform).

접속하였다.

보호전극 측의 전원은 누전사고 회로와 동일하게 150VDC 전압원과 부하저항 150Ω의 저항을 연결하여, 보상전류가 1A 흐르도록 하였다. 이를 통해 (+) 접지극에 흐르는 누설전류의 크기가 키르히호프 전류법칙에 의해 0A가 되어, 누전사고가 발생한 (+) 접지극의 손상 정도가 감소되어 최대한 (+) 접지극이 보호되도록 하였다. 이때 실험은 총 3시간 동안 진행하였다.

그림 5는 보호전극을 펄스전류로 구동할 경우의 접지극 전식 실험 개념도를 나타낸다. 보호전극은 그림 3과 동일한 구조로서 전압원을 사용하였다. 실험에서 보호전극에 흐르는 전류가 듀티비 0.5에 일정 주파수를 가지는 구형파의 형태를 갖도록 하기 위해, MCU를 통해 MOSFET의 Gate를 구동하여 MOSFET로 보호전극 전원을 구형파의 형태로 On/Off 시켰다. 또한 구형파의 전류 평균값 I_{2avg}가 (+) 접지극에 흐르는 누설전류 크기 1A와 일치하도록, 보호전극 전압원의 전압은 300VDC로 설정하고 보호전극 측에 부하저항 150Ω을 연결하였다.

실험에서 사용된 주파수는 총 0.1Hz, 1Hz, 10Hz, 20Hz, 50Hz, 100Hz, 1kHz를 고려하였으며, 보호전극에 직류전류(DC)가 흐를 때의 실험과 동일하게 총 3시간

TABLE I
EXPERIMENTAL RESULT BY GROUND ELECTRODE CORROSION (WEIGHT AND DAMAGE DEGREE OF EACH GROUND ELECTRODE)

| Case | Ground Electrode | | | | | |
|--------|------------------|-------------------|------------|-------------------|--------------|-------------------|
| | (-) | | (+) | | Compensation | |
| | Weight [g] | Damage Degree [%] | Weight [g] | Damage Degree [%] | Weight [g] | Damage Degree [%] |
| DC | 7.4 | 2.63 | 7.1 | 6.58 | 3.1 | 59.21 |
| 0.1 Hz | 7.4 | 2.63 | 7.3 | 3.95 | 2.9 | 61.84 |
| 1 Hz | 7.4 | 2.63 | 7.3 | 3.95 | 3.1 | 59.21 |
| 10 Hz | 7.4 | 2.63 | 7.4 | 2.63 | 3.1 | 59.21 |
| 20 Hz | 7.4 | 2.63 | 7.3 | 3.95 | 3 | 60.53 |
| 50 Hz | 7.4 | 2.63 | 7.3 | 3.95 | 2.8 | 63.16 |
| 100 Hz | 7.4 | 2.63 | 7.2 | 5.26 | 2.5 | 66.45 |
| 1 kHz | 7.4 | 2.63 | 7.2 | 5.26 | 2.4 | 68.42 |

동안 실험을 진행하였다. 실험이 끝난 후 접지극의 길이 22cm 기준 무게를 측정하여 3개의 접지극의 손상 정도를 평가함으로써, 보호전극에 직류전류가 흐를 때의 경우와 주파수에 따른 접지극의 전식정도를 비교분석을 하였다.

2.2 실험 결과

표 1은 보호전극에 직류전류(DC)가 흐를 때와 구형파의 전류가 흐를 때, 주파수에 따른 (+) 접지극과 (-) 접지극, 보호극의 무게 및 손상 정도에 대한 실험 결과를 나타낸다.

손상 정도(damage%)는 식 (1)과 같이 실험이전 접지극 무게 m_{before} 와 실험이후 접지극 무게 m_{after} 의 차이를 백분율로 구한 값을 100에서 빼준 값이다. 이때 (-) 접지극, (+) 접지극, 보호전극의 손상 정도를 합한 결과를 표 2에 기재하였다.

$$100 - \frac{m_{after}}{m_{before}} \times 100 = damage \text{ [%]} \quad (1)$$

그림 6는 표 1의 결과를 바탕으로 구형파 전류의 주파수에 따른 (+) 접지극과 (-) 접지극, 보호전극의 손상 정도를 그래프로 나타내었다. 전체 주파수 조건에서 보호전극은 다른 접지극에 비해 전식으로 인한 손상 정도가 높게 나타난다.

주파수 1Hz와 10Hz에서 보호전극의 손상 정도가 가장 낮게 나타나며, 주파수에 따른 보호전극의 손상 정도는 10Hz 이상 및 1Hz 이하의 주파수대에서 증가하는 결과가 나타난다.

(+) 접지극은 보호전극에 의해 전식으로부터 보호되지만 주파수에 따라 손상 정도가 다르게 나타나는 것을 보여준다. (+) 접지극은 주파수 10Hz에서 손상 정도가

TABLE II
EXPERIMENTAL RESULT BY GROUND ELECTRODE
CORROSION (SUMMATION OF DAMAGE DEGREE)

| Case | Ground Electrode |
|--------|--------------------------------|
| | Summation of Damage Degree [%] |
| DC | 68.42 |
| 0.1 Hz | 67.11 |
| 1 Hz | 65.79 |
| 10 Hz | 64.47 |
| 20 Hz | 67.11 |
| 50 Hz | 69.74 |
| 100 Hz | 73.68 |
| 1 kHz | 76.32 |

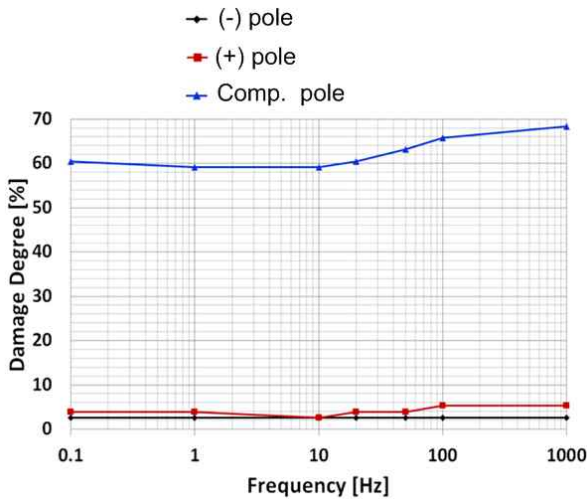


Fig. 6. Degree of damage on ground electrode according to frequency.

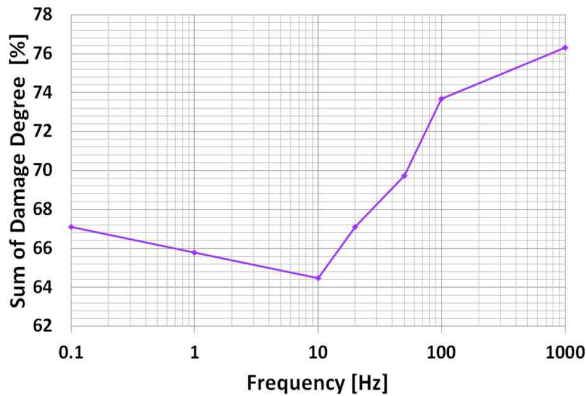


Fig. 7. Sum of the damage degree on all ground electrodes according to frequency.

가장 낮게 나타난다. 주파수 10Hz 이하에서 (+) 접지극의 손상 정도가 증가하며, 10Hz 이상에서도 손상 정도가 증가한다. (-) 접지극은 환원반응에 의해 상대적으로 손

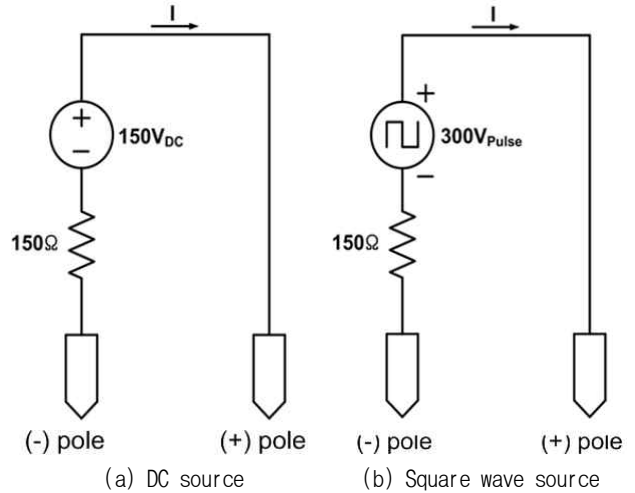


Fig. 8. Experimental conceptual diagram about two ground electrodes.

정도가 거의 없으며 주파수에 관계없이 일정하게 나타난다.

그림 7은 표 2의 주파수에 따른 세 대의 접지극의 전체 손상 정도의 합에 대한 그래프를 나타낸다. 전체적으로 주파수 10Hz 이상 및 이하로는 손상 정도가 증가하는 경향이 나타나며, DC보다 손상 정도가 큰 주파수 대역은 50Hz와 100Hz, 1kHz라는 것을 보여준다. 결과적으로 그림 6과 그림 7을 통해 (+) 접지극의 손상 정도를 최대한 감소시키고 동시에 보호전극의 전식정도가 낮은 최적의 주파수는 10Hz라는 것을 알 수 있었다.

3. 주파수에 따른 실험 결과 분석

3.1 실험 결과 분석을 위한 실험 조건

그림 7에서 10Hz 이상 및 이하로 손상 정도가 증가하는 경향이 실제 (+) 접지극과 (-) 접지극으로만 이루어진 실험에서 동일하게 나타나는 지를 확인하는 것이 필요하다. 이를 위해, (-) 접지극과 (+) 접지극만으로 이루어진 두 개의 접지극에 대해서 DC 전류와 펄스 전류를 흘려줄 경우에 대한 전식실험 및 분석을 진행하였다.

그림 8은 실험 결과에 대한 원인을 분석하기 위한 전식실험 개념도를 나타낸다. 그림 8(a)는 전원이 DC일 경우이며, 150VDC 전압원과 150Ω의 값의 저항을 연결하여 (-) 접지극에서 (+) 접지극으로 1A가 흐르도록 설정해 주었다. 그림 8(b)는 전원이 펄스일 경우이며, 전류가 듀티비 0.5에 일정 주파수를 가지는 구형파의 형태가 나타나도록 하였다. 이때 전압원의 전압은 300VDC로 설정하였으며 150Ω 값의 저항을 연결하여 전류의 평균 값이 1A가 흐르도록 설정하였다.

실험에서 주파수는 간단하게 0.1Hz, 1Hz, 10Hz, 20Hz, 50Hz, 100Hz에 대해서만 고려되었으며, 실험은 2시간 10분 동안 진행되었다.

TABLE III
WEIGHT AND DAMAGE DEGREE OF (+) GROUND ELECTRODE, CURRENT INTEGRAL VALUE AND DAMAGE/CURRENT INTEGRAL VALUE

| Case | (+) Ground Electrode | | | |
|--------|----------------------|------------|----------------------|-------------------------------|
| | Weight [g] | Damage [%] | I _{itg} [A] | Damage/I _{itg} [%/A] |
| DC | 4.6 | 39.47 | 0.822 | 48.03 |
| 0.1 Hz | 4.4 | 42.11 | 0.894 | 47.1 |
| 1 Hz | 4.5 | 41.45 | 0.886 | 46.8 |
| 10 Hz | 4.5 | 40.79 | 0.879 | 46.4 |
| 20 Hz | 4.4 | 42.11 | 0.882 | 47.73 |
| 50 Hz | 4.1 | 46.05 | 0.903 | 50.97 |
| 100 Hz | 3.8 | 50 | 0.941 | 53.14 |

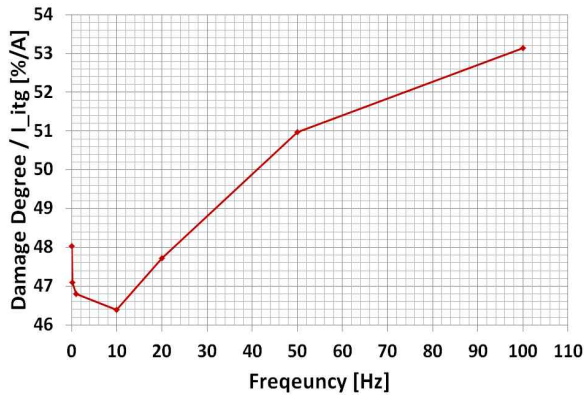


Fig. 9. Damage degree/current integral value according to frequency.

3.2 실험 분석 결과

표 3은 두 개의 접지극으로 이루어진 전식실험에서 2시간 10분 동안 직류전류(DC)가 흐를 때와 구형파 형태의 전류가 흐를 때 주파수에 따른 (+) 접지극의 무게 및 손상 정도와, 2시간 10분 동안 흐른 전류과형에 대한 적분값을 나타낸다. 이때 수치적으로 직류전류(DC)의 경우가 39.47%, 10Hz의 경우 40.79%에 비해 손상 정도가 낮게 나타났다.

이는, 그림 7에서 10Hz가 손상 정도가 낮은 최적의 주파수 조건이라는 결과에 대해 위배된다. 이러한 모순이 보이는 이유는 각 실험마다 전류의 적분값이 동일하지 않기 때문이다. 그러므로 모든 실험에서 똑같은 보상 전류 1A가 흐를 경우라는 조건을 갖추는 것이 필요하다. 이를 위해 손상 정도에 전류의 적분값을 나누어 동등한 보상전류에 대한 각 (+) 접지극의 손상 정도의 결과를 분석하여 표 3에 기재하였다.

그림 9는 표 3의 주파수에 따른 (+) 접지극으로 동등한 보상전류가 흐르는 조건을 갖춘 경우에 대한 손상 정도(손상 정도/전류 적분값)를 그래프로 나타내었다. 이

때 그림 9는 그림 7의 주파수에 따른 전체 접지극의 손상 정도처럼, 주파수 10Hz에서 손상 정도가 가장 낮으며 10Hz 이상 및 이하로 손상 정도가 증가하는 경향이 나타난다. 또한 DC보다 손상 정도가 낮은 구형파 보상 전원의 주파수대는 약 28Hz 이하인 것을 보여준다. 결과적으로 그래프를 통해 분석 결과, 그림 9의 결과는 그림 7의 결과에 적용할 수 있다. 또한 직류배전시스템의 접지극에서 동일한 값을 가진 누설전류가 흐르는 조건에서 10Hz의 구형파 형태의 전원으로 구동되는 보호극이 가장 손상 정도가 낮은 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문은 저압직류(LVDC) 접지계통에서 전식에 의한 안전사고를 일으킬 수 있는 요인인 (+) 접지극의 손상 정도를 최대한 감소시키기 위한 보상방법을 제시하였다. 실험을 통해 저압직류 접지 환경에서 전식보호용 전극에 구형파 형태의 주파수를 인가하는 경우와 직류 전류를 인가하는 경우에 따른 각 접지극의 손상 정도를 비교분석하고, 이에 대한 원인을 분석하였다.

동일한 누설전류가 흐르는 조건의 실험을 통하여, 전식보호용 전극에 10Hz 주파수의 구형파를 인가하는 경우가 전식에 의한 손상 정도가 가장 낮은 것이 확인되었다. 이 주파수에서는 (+) 접지극의 손상 정도를 최대한 감소시키고 동시에 보호전극의 사용시간을 연장시킬 수 있다.

본 연구의 결과는 직류 배전의 접지시스템을 보호하는 분야에 대해서 적용할 수 있다. 특히 선체를 통한 귀선 회로가 구성된 선박에서 사고 누설전류로 인한 선체의 전식에 대처하거나, 직류전기철도의 직류배전시스템 주변에 설치된 교량이나 금속 가스관의 특정 위치에 누설전류에 의한 전식이 발생하였을 때 이를 보상해 주는 등의 기술 분야에 적용할 수 있을 것으로 기대한다.

이 논문은 2016년도 정부(교육과학기술부)의 재원을 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임. (2016R1D1A3B01008279)

References

- [1] Y. J. Kim and H. Kim, "Electrolytic corrosion of earth electrodes according to polarities in leakage current accident of low-voltage direct current," in *KIEE Summer Conference 2018*, pp. 1334-1335, Jul. 2018.
- [2] A. Yadav, A. Sharma, and M. Chandra "Corrosion control using DC current Parallel wire system," in *International Conference on Advances in Engineering &*

Technology Research (ICAETR 2014), Aug. 2014.

- [3] S. Shankar, K. P. Pranav, and K. Raj, "Solar powered corrosion prevention in iron pipelines using impressed current cathodic protection," in *14th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, May 2014.
- [4] M. H. Min, H. Jung, Y. Park, H. C. Kim, and M. C. Shin, "A simulation analysis on electrolytic corrosion protection system in DC feeding system," in *KIEE Summer Conference 2011*, pp. 2188-2189, Jul. 2011.
- [5] H. Y. Park, D. N. Shin, J. C. Sim, and G. S. Kim, "A study on the characteristics of the electrical corrosion by leakage current of seoul metro," in *record of the Korean Society for Railway Autumn Conference*, 2012.



정우용(鄭雨龍)

1992년 1월 29일생. 2019년 공주대 전기전자제어공학부 졸업. 2019년~현재 동 대학원 전기전자제어공학과 석사과정.



김호성(金孝城)

1958년 10월 20일생. 1981년 서울대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 충북대 전기공학과 졸업(공박). 1996년~1997년 일본 오카야마대학 방문교수. 1999년~2000년 덴마크 연구부교수. 1987년~현재 공주대 전기전자제어공학부 교수.